連載

エンジニアの素朴なギモン

第3回 共振のモード

小暮裕明

筆者が技術コンサルタントとして多くの企業で経験した問答を紹介する連載の第3回である．今回は，まず，バンドパス・フィルタのギャップの違いによる特性の変化を調べ，共振のモードについて理解する．（編集部）

● わずかな差をデシベルで表示する

新人： 図1のバンドパス・フィルタは，中央部のギャップを1mm（本誌2007年9月号，pp.136-138の連載第2回を参照）から1.4mmに広げたモデルで，完全に左右対称形です．わずか400μmの違いなのに，リターン・ロスのグラフは図2のように，W字形ではなくV字形になってしまいました．なぜでしょうか．

先輩： 両端オープンの結合線路は，2本とも1/2波長の共振器として動作している．共振現象が起きている周波数では，これらの共振器のまわりに強い電磁的結合を生じて，左側の入力（ポート1）から右側の出力（ポート2）に向けて電磁エネルギーが移動する．ギャップを1.6mmに増やすと，図3のように図2よりさらにシャープなV字形になる．

帯域幅も狭くなってしまいました．

図2や図3は入力ポートで観測した反射係数（S_{11}）だから，共振周波数ではゼロ（無反射）に近い．$|S_{11}|$は図2では0.08，図3では0.03だ．両者の差は0.05だから，

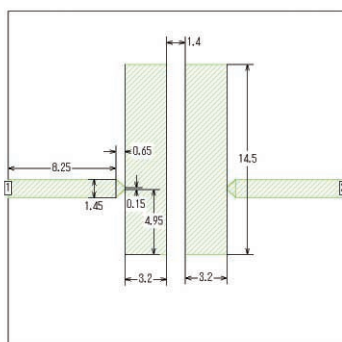



図1 バンドパス・フィルタのモデル
中央部のギャップを連載第1回で示した1.0mmから1.4mmに広げたもの．電磁界シミュレータSonnetを使用．SONNETのWebページは，http://www.sonnetsoftware.co.jp/およびhttp://www.sonnetsoftware.com/

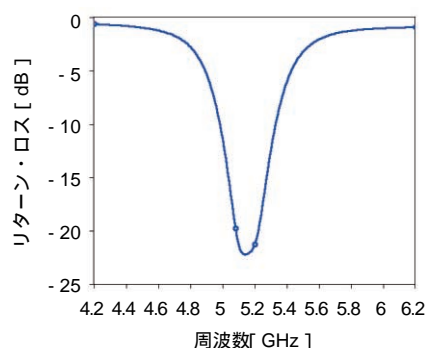



図2 ギャップ1.4mmのリターン・ロス
W字形ではなくV字形になった．

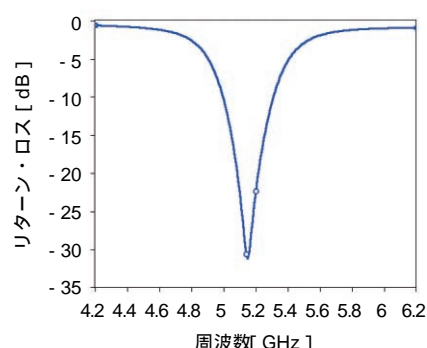



図3 ギャップ1.6mmのリターン・ロス
さらにシャープなV字形になる．

KeyWord dB，反射係数，リターン・ロス，臨界結合，双峰特性，単峰特性

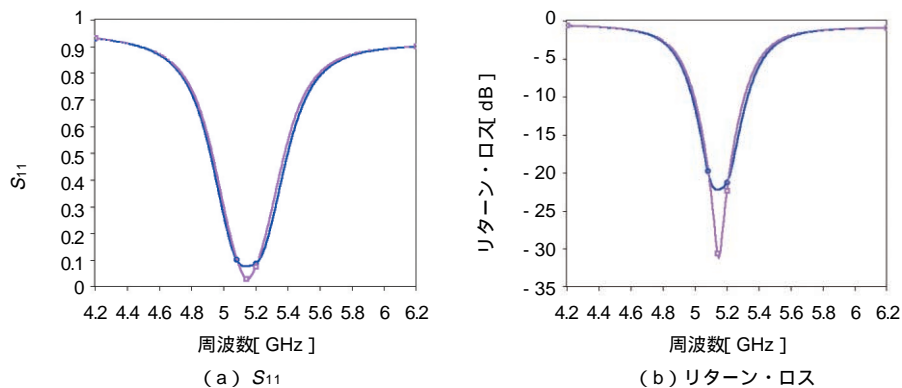



図4
S_{11}とリターン・ロス
(a)はS_{11}表示，(b)はリターン・ロスのデシベル表示である．

(a) S_{11}

(b) リターン・ロス

図4(a)の$|S_{11}|$表示ではわずかな違いに見える．しかしリターン・ロスはデシベル注1表示なので，図4(b)では9dBの差は大きく思えるかもしれない．

デシベル表示は微妙な違いが強調されるので，リターン・ロスは敏感な印象があります．

● 結合度の違い

ギャップが大きくなれば結合は弱くなると思います．

直観的にはそう考えられる．S_{21}は出力側への伝達係数だから結合の強さを表している．そこで図5を見ると，中心周波数の5.2GHz付近は，5.1GHzや5.3GHz付近より小さくなっている．しかもこれはギャップが最も小さい1mmの場合だ．

共振部には強い電磁エネルギーが発生しているのだから，これはおかしな現象です．

近づけば近づくほど結合が強くなるとは限らない．夫婦もつかず離れずの方が強く共感し合える….

実感がこもっています．

図6は左(1次)側と右(2次)側に並列LC共振回路があって，容量結合注2している．結合の強さを表す結合度κは，次のように表される．

$$\kappa = \frac{C}{\sqrt{C_1 C_2}} \quad \cdots\cdots (1)$$

κ＝1の場合を臨界結合といって，図7で示すように最大値をとる．κがこれより小さいと単峰特性，これより大きいと双峰特性を示す．

結合度を変えれば帯域幅を調整できますが，図6は二つのLC共振回路をコンデンサでつないでいます．

注1：デシベル[dB]とは，電力比の常用対数値(bel)の10倍(deci)．入力電力をP_1，出力電力をP_2とすると，$10\log_{10}(P_2/P_1)$[dB]は利得を表す．Sパラメータは電圧比なので，リターン・ロスは$20\log_{10}|S_{11}|$[dB]．

注2：コンデンサ内では電界の方向へ電荷が移動して電流が流れる．容量結合とは，コンデンサを介して一つの回路から別の回路へエネルギーを伝えること．

図5 S_{11}とS_{21}
デシベル表示なので，リターン・ロスとトランスミッション・ロスとも呼ぶ．

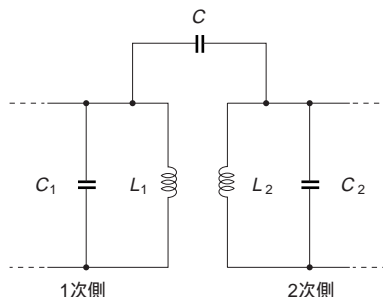



図6 容量結合による複同調回路
1次側と2次側に並列LC共振回路があって，容量結合している．

図7 複同調回路の周波数特性
κ＝1の場合を臨界結合といい，最大値をとる．

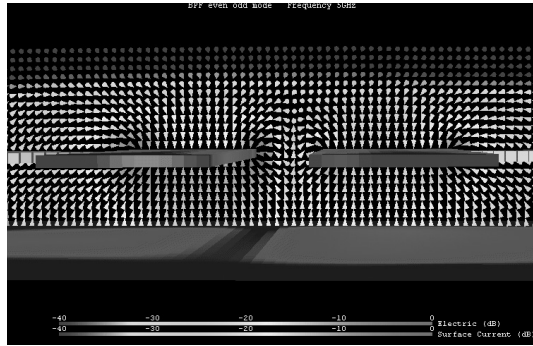



図8　偶モードの共振
5.0GHzにおける電界ベクトル表示．二つの共振器の上端部を含む断面の電界．

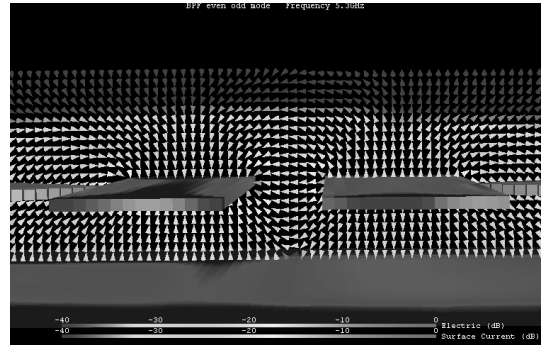



図9　奇モードの共振
5.3GHzにおける電界ベクトル表示．二つの共振器の上端部を含む断面の電界．

あっそうか．**図1**ではギャップ容量のCで結合しているから同じことですね．

● 二つの共振モード

これは複同調回路（p.107のコラム「複同調回路」を参照）といって，ラジオ受信機の中間周波増幅注3で同調（チューニング）の特性を調整するために使われる．一般放送用の受信機は双峰特性が，通信用受信機は単峰特性が適している．

マイクロストリップ線路で実現した**図1**は，同じしくみですか？共振部の長さは1/2波長なので，細長いパッチ・アンテナ(1)（マイクロストリップ・アンテナ）のように思えるのですが．

するどい指摘だ．正方形のパッチ・アンテナは，対向する縁部から漏れ出る電界が空間に広がることで電磁波を放射する．**図1**の細長いパッチでは放射に寄与する縁部は狭いが，結合しやすい構造だ．

市販のバンドパス・フィルタは金属箱でシールドされているので放射しません．

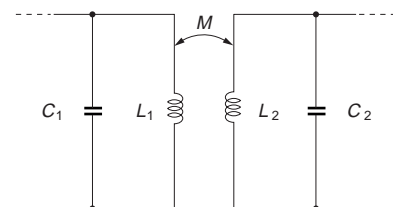
注3：受信機で電波を検波する前に，ある周波数（中間周波）に変換して増幅する（スーパ・ヘテロダイン方式）．

コラム 複同調回路

複同調回路は，本文で示した**図6**のC結合型のほかに，**図A**のようなM結合型があります．1次側と2次側に並列LC共振回路（同調回路）があり，1次側コイルと2次側コイルは，相互誘導結合しています．左右の並列LC共振回路は，ほぼ同じ周波数で共振したときに，空間を隔てて最大の電力を伝えられます．結合の強さを表す結合度κは，Mを両コイルの相互インダクタンスとして，結合度κは次のように表されます．

$$\kappa = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \cdots\cdots\cdots (A\text{-}1)$$

図6のC結合型と同様に，κ＝1の場合を臨界結合，κがこれより小さいと単峰特性，大きいと双峰特性を示します（**図7**）．

一般のトランス（変圧器）は，ファラデーが発見した電磁誘導作用によって，1次側から2次側へ交流電力を伝えるしくみです．普及している「Suica」や「ICOCA」などの非接触ICカードは，1次側（リーダ），2次側（タグ）とも，多巻コイルとコンデンサで13.56MHz付近に共振させているので，**図A**の回路で表現できます．タグがリーダから離れすぎるとMが小さくなり，結合度κも小さくなり通信できなくなります．また両者が接近しすぎるとκが過大になり，双峰特性の中央付近の周波数で通信できなくなることがあります．ICカードは，リーダと適度な距離を保つことで，単峰特性の状態で安定した通信を実現しているのです．

図A　誘導結合による複同調回路

また2枚のICカードを重ねて定期入れに入れると読み取りエラーになります．そこで，メッシュ状のシールド板と磁性体シートを張り合わせた「ICカードプロテクター」をカードの間に挟んで，かざした側だけ読める製品が開発されています（http://tamagawa-tht.ktpc.or.jp/iccardpro.htm）．

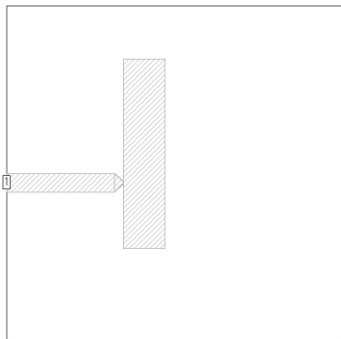



図10　バンドパス・フィルタの左側だけのモデル
5.16GHz付近で共振する．

(a) 位相0 °

(b) 位相－90 °

図11　5.16GHzにおける電界ベクトル
(a)は位相0 °，(b)は位相－90 °を示している．いずれも二つの共振器の上端部を含む断面の電界．

図8は5.0GHzにおける縁部の電界ベクトルで，左側と右側がほぼ同じ分布になっている．また**図9**は5.3GHzにおける電界ベクトルで，左右が一体となって共振しているが，電磁界の分布が異なる．前者は左右の電界ベクトルが同じパターンだが，これを偶モード(even mode)と呼ぶ．また後者は電界ベクトルが一方から他方へ向かっており，奇モード(odd mode)と呼んでいる．

図10のように片側だけだと5.16GHz付近で共振します．二つを対向させて近づけると，やや低い周波数と高い周波数の二つのモードで共振するようになりました．

一方5.16GHzでは，**図11**に示すように，左右が90 °ごとに共振している．時間をずらして左右が交替で共振しているようだ．このように三つの周波数では電磁界のでき方，つまりモードが異なっている．

広帯域になるメカニズムは面白いですね．

参考・引用*文献

(1) 小暮裕明；電磁界シミュレータで学ぶワイヤレスの世界，CQ出版社，2006年(第3版)．
(2) 小暮裕明；さまざまな伝送線路と導波管の電磁界，Design Wave Magazine，pp.67-74，2006年8月号．

こぐれ・ひろあき
小暮技術士事務所・技術士(情報工学部門)
http://www.kcejp.com/